

การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนในการเดือดเป็นชั้นฟิล์มแบบขึ้นกับเวลาบนผิวทรงกลม



นายเอกวิทย์ พิจิตรศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3518-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CALCULATION OF THERMAL FLUXES IN TIME DEPENDENT FILM BOILING ON THE
SURFACE OF A SPHERE

Mr.Akevit Pichitsiri

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-3518-5

Copyright of Chulalongkorn University

490223

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคำนวณค่าพังก์ชันความร้อนในการเดือดเป็นชั้นฟิล์มแบบขึ้นกับเวลา
บนผิวทรงกลม

โดย

นายเอกวิทย์ พิจิตรศิริ

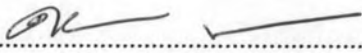
สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษา

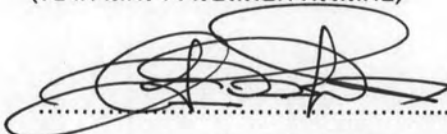
รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโมเชิต

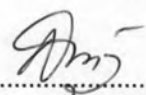
คณะกรรมการศาสตราจารย์ฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโมเชิต)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทรโยธา)

เอกวิทย์ พิจิตรศิริ : การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนในการเดือดเป็นชั้นฟิล์มแบบขึ้นกับเวลา บนผิวทรงกลม. (CALCULATION OF THERMAL FLUXES IN TIME DEPENDENT FILM BOILING ON THE SURFACE OF A SPHERE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโฆษิต, 91 หน้า. ISBN 974-14-3518-5.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาและสร้างแบบจำลองสำหรับการคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิววัตถุทรงกลมภายใต้ปรากฏการณ์การเดือดเป็นชั้นฟิล์มแบบขึ้นกับเวลา และได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมเพื่อใช้คำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

แบบจำลองที่สร้างขึ้นใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งเป็นทรงกลมเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดรัศมี 25.4 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิตั้งต้น 200,300,400 และ 500.00 องศาเซลเซียส โดยเหตุจากความไม่สมมาตรของการกระจายอุณหภูมิ จึงจำเป็นต้องสร้างเงื่อนไขการคำนวณใหม่สำหรับขอบเขตที่จุดศูนย์กลางสำหรับการคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายใต้พิกัดทรงกลม ในแบบจำลองนี้กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนในทิศทางตรงข้าม ณ จุดดังกล่าวมีความต่อเนื่อง เป็นผลให้สามารถคำนวณอุณหภูมิ ณ บริเวณรอบจุดศูนย์กลางได้ ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม พบว่ามีการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตามเวลาในลักษณะเดียวกัน ค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่าในช่วงสั้นๆ ในระยะเริ่มแรกของปรากฏการณ์นั้นค่าฟลักซ์ความร้อนจะมีค่าสูงอยู่ระดับหนึ่งแล้วเมื่อเวลาผ่านไปจะลดลงเนื่องจากได้เกิดชั้นฟิล์มของไอน้ำขึ้น ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนกั้นกลางระหว่างน้ำกับทรงกลม เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นค่าฟลักซ์ความร้อนจะสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากชั้นฟิล์มมีการหลุดลอกออกไป

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา2549

4670648921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: FILM BOILING/ HEAT FLUX/ SPHERE

AKEVIT PICHITSIRI: CALCULATION OF THERMAL FLUXES IN TIME DEPENDENT FILM BOILING ON THE SURFACE OF A SPHERE. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. SUNCHAI NILSUWAKOSIT, Ph.D., 91 pp. ISBN. 974-14-3518 -5.

This thesis studied and simulated the process of time dependent film boiling on the surface of a sphere in order to calculate the heat fluxes on the surface. A computer program was developed to calculate the temperatures inside a sphere and to calculate the heat fluxes. The heat fluxes were then used to obtain the average convective heat transfer coefficient for time dependent film boiling.

The proposed model was tested against the data obtained from the experiments conducted with a 24.5 millimeter radius stainless steel sphere. The initial temperatures of 200, 300, 400 and 500 degree Celsius were used in the experiments. Due to the asymmetry of temperature distribution, the new boundary condition based on the continuity of the heat fluxes across the center point was developed. This allowed the calculation of the temperature at the points around the center of the sphere to be possible. From the obtained results, the declining patterns for the averaged temperature of a sphere over time were found to be similar to each other. The heat fluxes were initially high for a brief period and then gradually declined due to the formation of the vapor film, which worked as an insulator between the water and the sphere. Over a period of time, the heat fluxes increased again because of the film separation.

Department:..... Nuclear TechnologyStudent's Signature:.....

Field of Study:.... Nuclear TechnologyAdvisor's Signature:.....

Academic Year:.....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ตัณชัย นิลสุวรรณ โหมินิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ ความเข้าใจและให้กำลังใจอย่างดี จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทโรยทา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ แนะนำ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้เงินทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ รวมทั้งบุคลากรทุกคนในภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ พร้อมทั้งกำลังใจที่ติดลอคมา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและพี่ของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนทางการเงินทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ เป็นผลมาจากความเมตตากรุณาของทุกท่านที่กล่าวไว้ข้างต้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2	การเค็ดเป็นชั้นฟิล์มบนวัตถุทรงกลม.....	5
2.1	การถ่ายเทความร้อน.....	5
2.1.1	การนำความร้อน.....	5
2.1.2	การพาความร้อน.....	6
2.1.3	การแผ่รังสีความร้อน.....	7
2.2	การเค็ดเป็นชั้นฟิล์ม.....	7
2.2.1	การเค็ดแบบแอ่ง.....	8
2.2.2	การเค็ดแบบพวยกั๊บ.....	9
2.3	ระบบสมการเชิงอนุพันธ์.....	13
2.3.1	สมการการอนุรักษ์มวลสำหรับของไหลสถานะเดียว.....	13
2.3.2	สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลสถานะเดียว.....	13
2.3.3	สมการการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของไหลสถานะเดียว.....	14
2.3.4	สมการการถ่ายเทความร้อนข้ามรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม และของเหลวระบายความร้อน.....	15

บทที่	หน้า
2.4	ข้อสมมุติฐานสำหรับการคำนวณการนำความร้อนภายในทรงกลมตัน.....16
2.5	การหาค่าของชั้นฟิล์ม.....17
3	สมการการนำความร้อนและการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ.....18
3.1	สมการการนำความร้อน.....18
3.2	การแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....24
3.2.1	ระเบียบวิธีของออยเลอร์.....24
3.2.2	ระเบียบวิธีของฮวน.....25
4	วิธีการและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....27
4.1	การกำหนดคุณสมบัติผิวของทรงกลม.....27
4.2	การประมาณค่าในช่วง.....27
4.3	วิธีการแก้สมการ ในรูปแบบของระบบสมการเชิงเส้น.....30
4.4	การคำนวณอุณหภูมิของทรงกลม.....33
4.4.1	วิธีการคำนวณอุณหภูมิภายในวัตถุภายในทรงกลมระบบ พิกัดทรงกระบอก..... 34
4.4.2	วิธีการคำนวณอุณหภูมิภายในวัตถุภายในทรงกลมระบบ พิกัดทรงกลม.....36
4.5	ขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของทรงกลม.....40
5	ผลการคำนวณ.....43
5.1	ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา.....43
5.1.1	การคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมแบบที่ 1.....43
5.1.2	การคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมแบบที่ 2.....45
5.1.3	การคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมแบบที่ 3.....62
5.2	ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา.....71
5.2.1	การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนแบบที่ 1.....71
5.2.2	การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนแบบที่ 2.....71
5.2.3	การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนแบบที่ 3.....72

บทที่	หน้า
6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
6.1 บทสรุปผลการวิจัย.....	76
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รูปของลาปลาเซียน โอเปอเรเตอร์ในระบบแกนต่างๆ.....	22
4.1 คุณสมบัติของวัตถุทรงกลม น้ำและไอน้ำ.....	41

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ.....	5
2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....	6
2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี.....	7
2.4 เส้นโค้งการเดือด (boiling curve).....	8
2.5 ส่วนประกอบของการเดือดแบบพาบังคับภายในท่อร้อนแนวดิ่ง.....	12
2.6 การจำลองการหลุดลอกของชั้นฟิล์ม.....	17
3.1 ระบบแกนของวัตถุในพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	20
3.2 ระบบแกนของวัตถุในพิกัดทรงกระบอก.....	23
3.3 ระบบแกนของวัตถุในพิกัดทรงกลม.....	23
3.4 ระเบียบวิธีของออยเลอร์.....	24
3.5 ระเบียบวิธีของฮวน.....	26
4.1 การประมาณค่าโดยใช้เส้นโค้ง.....	28
4.2 ลักษณะเมตริกซ์ของสมการเงื่อนไข 16 สมการ.....	30
4.3 รูปแบบการกระจายของโหนดในทรงกลมในพิกัดทรงกระบอก.....	35
4.4 รูปแบบการกระจายของโหนดในทรงกลมในพิกัดทรงกลม.....	38
4.5 แผนผังขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา.....	42
5.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาในแนวรัศมี สำหรับแบบที่ 1 ($dr = 2.54 \text{ mm}$, $d\theta = 0.04186 \text{ radian}$).....	44
5.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยภายในทรงกลมตามฟังก์ชันของเวลาสำหรับแบบที่ 1.....	44
5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยภายในทรงกลมตามฟังก์ชันของเวลา สำหรับแบบที่ 1 โดยเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำทรงกลม.....	45
5.4 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาในระบบ พิกัดทรงกลม 2 มิติ โดยใช้เงื่อนไขที่จุดศูนย์กลางคือ $\frac{\partial T}{\partial r}\Big _{r=0} = 0$ ($dr = 2.54 \text{ mm}$, $d\theta = 0.04186 \text{ radian}$).....	46
5.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ในระบบพิกัดทรงกระบอก 2 มิติ ($dr = 0.3387 \text{ mm}$, $dz = 2.54 \text{ mm}$).....	47

ภาพประกอบ	หน้า
5.6 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ในระบบพิกัดทรงกลม 2 มิติ โดยใช้เงื่อนไขที่จุดศูนย์กลางคือ $\frac{\partial T}{\partial r}\bigg _{\theta} = -\frac{\partial T}{\partial r}\bigg _{\pi-\theta}$ ($dr = 2.54 \text{ mm}$, $d\theta = 0.04186 \text{ radian}$).....	47
5.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 5 \text{ sec}$ ในวิธีการคำนวณรูปแบบต่างๆ.....	48
5.8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 10 \text{ sec}$ ในวิธีการคำนวณรูปแบบต่างๆ.....	49
5.9 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 5 ส่วนและในแนวมุมเป็น 75 ส่วน.....	50
5.10 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 10 ส่วนและในแนวมุมเป็น 75 ส่วน.....	50
5.11 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 20 ส่วนและในแนวมุมเป็น 75 ส่วน.....	51
5.12 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 30 ส่วนและในแนวมุมเป็น 75 ส่วน.....	51
5.13 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 50 ส่วนและในแนวมุมเป็น 75 ส่วน.....	52
5.14 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 5 \text{ sec}$ โดยแบ่งในแนวมุมเท่ากับ 75 ส่วน.....	53
5.15 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 10 \text{ sec}$ โดยแบ่งในแนวมุมเท่ากับ 75 ส่วน.....	53
5.16 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 30 ส่วนและในแนวมุมเป็น 3 ส่วน.....	54
5.17 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 30 ส่วนและในแนวมุมเป็น 6 ส่วน.....	55
5.18 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 30 ส่วนและในแนวมุมเป็น 12 ส่วน.....	55
5.19 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยแบ่งในแนวรัศมีเป็น 50 ส่วนและในแนวมุมเป็น 12 ส่วน.....	56

ภาพประกอบ	หน้า
5.20 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 5$ sec	
โดยแบ่งในแนวรัศมีเท่ากับ 30 ส่วน.....	57
5.21 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลม ณ เวลา $t = 10$ sec	
โดยแบ่งในแนวรัศมีเท่ากับ 30 ส่วน.....	57
5.22 อุณหภูมิที่ผิวเปลี่ยนแปลงตามมุมเป็นแบบเชิงเส้นแต่มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 250°C	58
5.23 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ผิว 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 250°C	59
5.24 อุณหภูมิที่ผิวเปลี่ยนแปลงตามมุมเป็นแบบเชิงเส้นแต่มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 350°C	59
5.25 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ผิว 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 350°C	60
5.26 อุณหภูมิที่ผิวเปลี่ยนแปลงตามมุมเป็นแบบเชิงเส้นแต่มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 450°C	60
5.27 ผลการคำนวณอุณหภูมิภายในทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา	
โดยใช้อุณหภูมิที่ผิว 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 450°C	61
5.28 ผลการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยภายในทรงกลมตามฟังก์ชันของเวลาสำหรับแบบที่ 2	
โดยสมมุติให้อุณหภูมิที่ 0 เเรเดียน มีค่า 150°C และอุณหภูมิที่ 3.14 เเรเดียน มีค่า 250°C	62
5.29 แสดงการประมาณค่าอุณหภูมิที่ผิวจากการพลทลองในฟังก์ชันต่างๆ.....	63
5.30 ผลการทดลองของอุณหภูมิที่ผิวตามฟังก์ชันของเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ	
เมื่อใช้อุณหภูมิภายในทรงกลมเริ่มต้นเท่ากับ 200°C	64
5.31 ผลการทดลองของอุณหภูมิที่ผิวตามฟังก์ชันของเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ	
เมื่อใช้อุณหภูมิภายในทรงกลมเริ่มต้นเท่ากับ 300°C	65
5.32 ผลการทดลองของอุณหภูมิที่ผิวตามฟังก์ชันของเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ	
เมื่อใช้อุณหภูมิภายในทรงกลมเริ่มต้นเท่ากับ 400°C	65
5.33 ผลการทดลองของอุณหภูมิที่ผิวตามฟังก์ชันของเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ	
เมื่อใช้อุณหภูมิภายในทรงกลมเริ่มต้นเท่ากับ 500°C	66
5.34 อุณหภูมิที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา โดยการประมาณค่าด้วย	
ฟังก์ชันแบบที่ 3 เมื่อใช้อุณหภูมิภายในทรงกลมเริ่มต้นเท่ากับ 200°C	66

